

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ НЕРУЙНІВНИХ МЕТОДІВ, ЯКІ БАЗУЮТЬСЯ НА ВИМІРІ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУЖНИХ КОЛИВАНЬ

Типи пружних коливань

Пружні коливання – це коливання матеріальних часток, що виникають під дією механічного збудження і поширюються в пружному середовищі.

В області неруйнівного ультразвукового контролю якості матеріалів використовують широкий діапазон частот (f) і інтенсивностей (I) таких коливань. Це пов'язано зі значною розмаїтістю будови структури досліджуваних матеріалів, розмірів об'єктів контролю і власне самої постановки задачі вимірювального процесу. У зв'язку з цим застосовуваний частотний діапазон пружних коливань розташовується від звукових хвиль з частотами $f = 2,5 \dots 20$ кГц до гіперзвукових, з частотою $f > 10^9$ Гц.

Оскільки задачами неруйнівного контролю є визначення фізико-механічних характеристик, виявлення структурних неоднорідностей матеріалів, то для їхнього рішення застосовують пружні коливання невисокої інтенсивності $I < 1$ Вт/см².

Класичні дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів ультразвуковими методами полягають ось у чому. Сформовані електричні коливання з необхідними параметрами подаються на спеціалізований перетворювач. Такий перетворювач забезпечує одержання пружних коливань.

жних коливань, що вводяться в матеріал об'єкта контролю безпосередньо чи через шар контактної речовини. Пружні коливання, які розповсюджуються в матеріалі, приймаються аналогічним перетворювачем для одержання електричного інформаційного сигналу (рис.2.1). Виміру підлягають час, швидкість поширення пружної хвилі, її амплітудно-частотні характеристики.

Процес поширення пружних коливань у твердому тілі або в іншій середовищі – рідкому чи у вигляді газу, характеризуються трьома основними характеристиками: зміною (тензором) напруги (σ_{ij}), зсувом часток (u_i) (потенційною енергією) і деформацією (du) – зміною взаємного розташування елементарних часток середовища [1, 2]. Остання характеристика дає можливість розрізняти деформацію розтягання - стиску (ϵ_{ij}) і деформацію зсуву (ϵ_{ijk}).

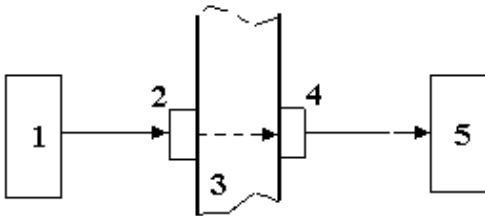


Рис.2.1 – Структурна схема класичного дослідження фізико-механічних властивостей матеріалу ультразвуковими методами:

1 – генератор ультразвукових коливань; 2 – випромінюючий перетворювач; 3 – об'єкт контролю; 4 – приймальний перетворювач; 5 – регістратор характеристик інформаційного ультразвукового сигналу

Деформація розтягання - стиску з'являється в тому випадку, якщо елементарні частки середовища роблять коливання уздовж з'єднуючого їхнього деякого умовного відрізка, наприклад, по осі (x):

$$\epsilon_{xx} = du / dx. \quad (2.1)$$

Деформація зсуву (ϵ_{ijk}) спостерігається тоді, коли пружні коливання часток відбуваються перпендикулярно цьому відрізка [1, 5]:

$$\epsilon_{xyz} = du_x / dx + du_y / dy + du_z / dz = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}. \quad (2.2)$$

Особливістю формування деформацій є те, що деформації зсуву

відсутні в речовинах, які знаходяться в рідкій чи газоподібній фазах. У твердих тілах можуть збуджуватися обидва види пружних деформацій.

Отже, виходячи з фізики процесу поширення пружних хвиль можна зробити висновок, що неруйнівний контроль якості матеріалів заснований на ефекті дискретної (локальної) або інтегральної тимчасової чи просторової зміни фізико-механічних властивостей матеріалу, що відбивається на характеристиках інформаційного контрольованого сигналу. Залежність між напругою у твердому тілі та його пружними деформаціями, що спостерігається при малих амплітудах зсуву, описується законом Гука. В узагальненому вигляді ця залежність для ізотропних середовищ має вигляд [2, 3]:

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} \cdot \Lambda \cdot \epsilon_{ii} + 2\mu \cdot \epsilon_{ij}, \quad (1.3)$$

де σ_{ij} – тензор напруг; δ_{ij} – коефіцієнт загасання пружної хвилі; ϵ_{ii} , ϵ_{ijk} – відповідно деформація розтягання – стиску та деформація зсуву; Λ, μ – константи Ламе;

Константи Ламе (Λ, μ) пов'язані визначеними математичними залежностями з такими фізико-механічними характеристиками твердого тіла, як модуль нормальної пружності (E), модуль зсуву (G) і коефіцієнт Пуассона (ν):

$$E = \mu(3\Lambda + 2\mu)/(\Lambda + \mu); \quad G = \mu; \quad (2.4)$$

$$\nu = \frac{\Lambda}{2(\Lambda + \mu)} = \frac{E}{2G} - 1 \quad (2.5)$$

Для забезпечення існування пружної хвилі у твердому тілі чи іншим середовищі необхідно викликати деяке збудження такого середовища зовнішнім джерелом енергії. При цьому робота, виконана таким зовнішнім джерелом, за винятком утрат на перетворення енергії, втрат у контактному шарі, втрат при переході границь середовищ «п'єзоелектричний перетворювач – контактне середовище – досліджуване середовище», перетворюється в енергію пружних хвиль, що поширюються в досліджуваному матеріалі.

Основними характеристиками гармонійних пружних хвиль є довжина хвилі (λ) – відстань між її двома максимумами або мінімумами, частота (f) і період коливань (T) – час, за який відбувається один пов-

ний цикл коливань. Ці величини пов'язані між собою такими співвідношеннями:

$$f = 1/T; \quad \lambda/c = T,$$

де c – швидкість звуку в досліджуваному середовищі.

У теорії пружних хвиль використовується також параметр, який називається хвильовим вектором (k), що орієнтований у напрямку поширення пружної хвилі: $k = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$ [1, 2].

Випромінювання пружної хвилі практично в усіх випадках виробляється джерелами обмежених розмірів відносно довжини хвилі (λ). У результаті цього виникає хвиля, що характеризується розбіжним фронтом. При точковому джерелі випромінювання пружну хвилю представляють у вигляді сферичної. При збудженні такої хвилі в середовищі, за умови порушення її синусоїдальними коливаннями, спостерігатиметься її поширення відносно деякої системи координат x, y, z . Деформація ділянок середовища на відстані (r) від джерела коливань (центра системи координат) відбуватиметься через деякий відрізок часу $t = r/c$. При цьому на будь-якій відстані $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ від джерела коливань спостерігатиметься зменшення амплітуди пружної хвилі, що виликається загасанням і поглинанням її енергії. Якщо зневажити загасання пружної хвилі, що обумовлюється взаємним тертям часток досліджуваного матеріалу, то її амплітуда убаватиме пропорційно відстані (r) [2, 3]. У цьому випадку математичний вираз для сферичної хвилі, з урахуванням запізнювання за часом і убавання її амплітуди, набуває вигляду:

$$W = \frac{A_0}{r} \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{r}{c} \right), \quad (2.6)$$

де A_0 – максимальна амплітуда пружної хвилі в точці збудження; r – деяка відстань від точки збудження пружної хвилі; T – період коливань пружної хвилі; t – час.

Зі збільшенням відстані від джерела коливань кривизна сферичної поверхні пружної хвилі зменшується. На деякій досить великій відстані (r_i), при малому розмірі джерела коливань відносно довжини хвилі і ($\lambda \ll r_i$), таку хвилю на невеликих ділянках простору можна вважати квазіплоскою. У зв'язку з цим, для опису пружної хвилі у таких випадках використовується математичний вираз [2, 3]:

$$W = \frac{A_0}{r} \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (2.7)$$

де x – напрямок поширення пружної хвилі.

Вирази, що описують сферичну (2.6) і плоску (2.7) хвилю, є частинними розв'язками наступного диференціального рівняння 2-го порядку з частинними похідними, яке описує поширення хвиль у пружному середовищі – так зване хвильове рівняння [1-3]:

$$\frac{dW}{dx^2} + \frac{dW}{dy^2} + \frac{dW}{dz^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{d^2W}{dt^2}. \quad (2.8)$$

У скороченому вигляді це рівняння записується так:

$$\Delta \cdot W = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{d^2W}{dt^2}, \quad (2.9)$$

де $\Delta^2 = d^2/dx^2 + d^2/dy^2 + d^2/dz^2$ – оператор Лапласа.

Іншу інтерпретацію хвильового рівняння (2.8), (2.9) можна одержати, прирівнюючи різницю сил, прикладених до протилежних граней деякого елементарного об'єму твердого тіла, до добутку маси на прискорення:

$$\rho \frac{d^2 u_x}{dt^2} = \frac{d\sigma_{xx}}{dx} + \frac{d\sigma_{xy}}{dy} + \frac{d\sigma_{xz}}{dz}, \quad (2.10)$$

де ρ – питома щільність середовища, у якому поширюється пружна хвиля.

Підставляючи замість напруг деформацій залежність, виражену законом Гука (2.3), одержують математичну форму хвильового рівняння:

$$\rho \frac{d^2 u_x}{dt^2} - (\Lambda + \mu) \frac{d\varepsilon}{dx} - \mu \Delta^2 u_x = 0. \quad (2.11)$$

У наведені вище математичні вирази (2.8), (2.9), (2.11) входять з різними знаками другі похідні за часом і координатами від деякої змінної величини.

Використовуючи математичний апарат векторного аналізу, хвильове рівняння (2.11) записується для всіх координат щодо точки випромінювання пружної хвилі у вигляді деякого векторного поля [2-4]:

$$\rho \frac{d^2 u}{dt^2} = (\Lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} u + \mu \Delta^2 \cdot u. \quad (2.12)$$

З положень векторного аналізу відомо, що будь-яке векторне поле може бути представлене у вигляді суми векторів. У розглянутому випадку векторне поле може бути представлене у вигляді суми скалярного і векторного потенціалів:

$$U = u_l + u_t = \operatorname{grad} \varphi + \operatorname{rot} \varphi. \quad (2.13)$$

Використовуючи вирази (2.12), (2.13), одержують наступні математичні співвідношення:

$$\frac{d^2 u_l}{dt^2} - c_l^2 \cdot \Delta^2 \cdot u_l = 0 \quad ; \quad c_l = \sqrt{(\Lambda + 2\mu)/\rho} ; \quad (2.14)$$

$$\frac{d^2 u_t}{dt^2} - c_t^2 \cdot \Delta^2 \cdot u_t = 0 ; \quad c_t = \sqrt{\mu/\rho}. \quad (2.15)$$

Із отриманих рівнянь випливає, що вектор (u) пружних коливань, при їх розповсюдженні у твердому тілі, розпадається на два, які відповідають хвилям (u_l, u_t), що характеризуються різними значеннями швидкості поширення в середовищі (c_l, c_t) [2, 3].

Таким чином, у необмеженому твердому тілі існує два основних типи хвиль, які прийнято називати подовжніми (u_l) і поперечними (u_t) [2, 3]. Ці хвилі характеризуються своїми швидкостями поширення – c_l, c_t .

Подовжня хвиля (c_l) при поширенні у твердому тілі викликає деформації розтягання - стиску, тому що напрямок коливань у ній збігається з напрямком її поширення. При поширенні поперечної хвилі (c_t) у твердому тілі формуються деформації зсуву, тому що напрямок коливань у цьому випадку перпендикулярний напрямку поширення пружної хвилі. Слід зазначити, що в рідинах і газах поперечні хвилі не існують, тому що в цих середовищах відсутня пружність форми. Відношення швидкостей подовжньої (c_l) і поперечної (c_t) пружних хвиль залежить від коефіцієнта Пуассона (ν) середовища, у якому поширюються такі коливання. Так, наприклад, у металах, для яких у більшості випадків значення коефіцієнта Пуассона $\nu \approx 0,3$, відношення $c_l/c_t \approx 0,55$ [2-4]. Як було зазначено вище, розглянуті типи хвиль

характерні для необмежених середовищ. На практиці, у зв'язку з появою деяких граничних умов – наявністю обмежуючої поверхні в досліджуваному об'єкті контролю, визначеним орієнтуванням її щодо напрямку поширення коливань, може відбуватися вертикальна або горизонтальна поляризація поперечної хвилі. У реальних умовах, у зв'язку з кінцевими розмірами об'єктів контролю, найчастіше використовується вертикально поляризована хвиля.

Подовжні та поперечні пружні хвилі найбільше широко використовуються для неруйнівного контролю якості матеріалів. З їхньою допомогою здійснюється як дефектоскопія структури матеріалів, так і визначення їхніх фізико-механічних властивостей [1, 3]. Уздовж поверхні твердого тіла також поширюється пружна хвиля, що зветься поверхневою хвилею Релея (u_s). Така хвиля характеризується своєю швидкістю поширення (c_s). Ця хвиля складається з лінійної комбінації подовжніх і поперечних коливань, амплітуди яких залежать від глибини їхнього проникнення в матеріал об'єкта контролю. Отже, характерною рисою такої хвилі є мале загасання амплітуди по осі абсцис і значна зміна її амплітуди вздовж осі ординат [1, 4, 6]. Використовуючи величину швидкості поширення поперечних хвиль (c_t) у конкретному матеріалі, представляється можливим наближене обчислення швидкості поширення поверхневої хвилі Релея (c_s) за формулою [1, 4]

$$c_s \approx c_t \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu}. \quad (2.16)$$

Наприклад, для матеріалів зі значенням коефіцієнта Пуассона $\nu \approx 0,3$, швидкість поширення хвилі Релея $c_s \approx 0,93 \cdot c_t$. Як було зазначено вище, характерною рисою поверхневих хвиль Релея є їх досить слабе загасання уздовж осі абсцис (x). У зв'язку з цим цей тип хвиль здатний поширюватися на великі відстані уздовж поверхні твердого тіла.

Особливості поширення хвиль Релея визначають їхню область застосування – дефектоскопія структури поверхневих і підповерхневих шарів матеріалів, контроль розшарування композиційних середовищ, дослідження структури верхніх шарів у експлуатованих виробах чи у конструкціях, які мають значні геометричні розміри.

Збудження та прийом ультразвукових коливань

П'єзоелектричні перетворювачі. Для збудження і прийому пружних хвиль, що поширюються в досліджуваному матеріалі, використовують електро механічне і механіко-електричне перетворення коливань ультразвукової частоти в пружні хвилі за допомогою спеціалізованих п'єзоелектричних перетворювачів.

При реалізації ультразвукових неруйнівних методів контролю якості матеріалів і виробів практично у всіх випадках використовуються перетворювачі, що мають прямий і зворотний п'єзоелектричний ефект. Прямий п'єзоелектричний ефект полягає у виникненні електричної поляризації деяких діелектриків при їх механічній пружній деформації. Характерною рисою таких матеріалів є наявність зворотного п'єзоелектричного ефекту, що складається в пружній зміні геометричних розмірів чи появи пружних деформацій зсуву в п'єзоперетворювачі з наявністю електричної напруги на електродах такого діелектрика [1, 10, 12, 13].

У практиці неруйнівного ультразвукового контролю якості, в основному, застосовують п'єзоелектричні кристали і п'єзокераміку.

П'єзоелектричні кристали використовуються, як правило, у вигляді природних мінералів – кварц, цинкова обманка, сегнетова сіль тощо. Кристалічні п'єзоелектричні перетворювачі виготовляються з різною поляризацією стосовно будови кристалічних ґрат.

Так, наприклад, кварцові п'єзоелектричні перетворювачі застосовуються у формі пластин виду X -зрізу і Y -зрізу. П'єзоперетворювач, виготовлений із пластин кварцу X -зрізу являє собою пластину, вирізану перпендикулярно до оптичної осі X . Така орієнтація кристала забезпечує порушення пружних коливань по товщині пластини, тобто подовжніх хвиль (u_z) [4, 13]. У кварцовому п'єзоперетворювачі, що виконаний із пластини кварцу Y -зрізу, збуджуються зсувні коливання, тобто поперечні хвилі (u_y) [4, 13].

Штучно синтезовані окиси та солі п'єзоелектричних матеріалів представляються у виді п'єзокераміки. У нашій країні найпоширенішими є п'єзоелектрична кераміка цирконат-титанат свинцю (ЦТС) і твердий розчин чотирьохкомпонентної системи, що включає титанат свинцю і цирконат свинцю (ПКР). У закордонній практиці неруйнівного контролю якості основними використовуваними матеріалами керамічних п'єзоелектричних перетворювачів є метаніобат свинцю і ніобат літію [1, 4].

П'єзоелектричні перетворювачі, виготовлені з ніобату літію характеризуються досить високою добротністю (коефіцієнтом загасання

коливань поза резонансною частотою). Завдяки цьому, за допомогою таких перетворювачів з'являється можливість формування коротких зондувальних імпульсів, що необхідні при ряді досліджень структури матеріалів.

Характерною рисою п'єзоелектричних перетворювачів, виготовлених з метаніобату свинцю, є порівняно низький рівень коливань по ширині пластини, що є паразитними відносно коливань по її товщині. Переваги використання п'єзоелектричної кераміки для випромінювання і прийому пружних хвиль перед іншими п'єзоелектричними матеріалами полягають у високій ефективності електромеханічного і механіко-електричного перетворення. До їхніх позитивних характеристик варто віднести також можливість створення перетворювачів необхідної конфігурації, малогабаритність та ін.

Основною характеристикою п'єзоелементів, що визначає ефективність електромеханічного і механіко-електричного перетворення, служить коефіцієнт електромеханічного зв'язку (K_{ik}). Його визначають як відношення взаємної пружно-електричної енергії до середнього геометричного значення пружної та електричної енергії [4, 12].

Для п'єзоелектричного перетворювача, виготовленого у вигляді пластини, що робить пружні деформації розтягання – стиску по товщині, коефіцієнт електромеханічного зв'язку (K_{ik}) може бути визначений за формулами (2.17, 2.18) [2, 4, 12]. Для п'єзоелектричного перетворювача, виготовленого у виді пластини, закріпленої без механічних деформацій:

$$K_{ik} = \sqrt{e^2 / (\rho \cdot c^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon)}, \quad (2.17)$$

де e – п'єзоелектрична константа; c – швидкість звуку в п'єзоелектричному матеріалі; ϵ – відносна діелектрична проникність п'єзоелектричного матеріалу, в якому відсутня постійна (статична) механічна напруга; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{12}$ Ф/м – діелектрична стала; ρ – питома щільність діелектричного матеріалу.

Величина швидкості звуку (c), що входить у формулу (2.17), обмірювана при наявності деякого постійного (статичного) електричного зсуву на п'єзоелектричному елементі.

Для п'єзоелектричного перетворювача, виготовленого у вигляді пластини, із закріпленими гранями з деякими статичними механічними деформаціями, коефіцієнт електромеханічного зв'язку розраховується

за формулою:

$$K_{ik} = \frac{d_{ik}}{\sqrt{\epsilon^\delta \cdot \epsilon_0 \cdot S^e}}, \quad (2.18)$$

де d_{ik} – п'єзомодуль; ϵ^δ – відносна діелектрична проникність п'єзоелектричного матеріалу, у якому присутня механічна напруга; ϵ_0 – діелектрична стала; S^e – коефіцієнт пружної піддатливості п'єзоелектричного матеріалу.

Як випливає з формул (2.17), (2.18), у тому випадку, якщо на гранях п'єзоелектричного елемента присутня деяка величина статичної механічної напруги, то значення його відносної діелектричної проникності (ϵ^δ) змінюється. Взаємозв'язок зміни відносної діелектричної проникності при відсутності і наявності статичної механічної напруги на пластині п'єзоелектрика описується через коефіцієнт електромеханічного зв'язку [2, 12]:

$$(\epsilon^\delta - \epsilon) / \epsilon^\delta = K_{ik}^2. \quad (2.19)$$

Фізично значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку (K_{ik}) п'єзоелемента визначає його ефективність випромінювання і прийому пружних хвиль, що поширюються в досліджуваному матеріалі.

Цей параметр враховується також при проектуванні лінії узгодження конкретного п'єзоелектричного перетворювача з вихідними і вхідними блоками контрольно-вимірювального пристрою. У загальному випадку слід зазначити, що для позитивного рішення задачі узгодження бажано застосовувати п'єзоелектричні матеріали, що характеризуються значною величиною відносної діелектричної проникності (ϵ^δ) за умови збереження великого значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку (K_{ik}).

Важливими характеристиками п'єзоелектричних матеріалів є також параметр випромінювання (P_n) і параметр прийому (P_p) [2, 4, 12]. Значення параметра випромінювання розраховується за формулою

$$P_n = (d_{ik} / S^E)^2, \text{ Кл/м}^2. \quad (2.20)$$

Параметр прийому обчислюється з використанням математичного виразу:

$$P_{\Pi} = (d_{ik} / \epsilon^{\delta}) \cdot 10^{-12}, \text{ Кл/Н.} \quad (2.21)$$

Параметр випромінювання (P_{Π}) визначає чутливість випромінюючого п'єзоелектричного перетворювача відносно прикладеної величини напруги генератора зондувальних сигналів, тобто фактично становить ефективність електромеханічного перетворення пружних хвиль. Параметр прийому (P_{Π}) визначає чутливість прийомного перетворювача в режимі холостого ходу, тобто ефективність механіко-електричного перетворення п'єзоелектричного матеріалу. Значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку, відносної діелектричної проникності, швидкості звуку, а також параметрів випромінювання і прийому для деяких найбільш розповсюджених п'єзоелектричних матеріалів приведені в табл. 2.1 [2, 4, 12].

Таблиця 2.1
Основні характеристики п'єзоелектричних матеріалів

Тип п'єзоелектричного матеріалу	Коефіцієнт електромеханічного зв'язку, (K_{ik})	Відносна діелектрична проникність, (ϵ^{δ})	Швидкість звуку, C , 10^3 м/с	Параметр випромінювання, $(d_{ik} / S^E)^2$ Кл/м ²	Параметр прийому, $(d_{ik} / \epsilon^{\delta}) \cdot 10^{-12}$ Кл/Н	Пр
Сегнетова сіль	0,65	37	3,1	53,6	0,78	Зрі
Кварц	$9,5 \cdot 10^{-2}$	4,5	5,47	0,033	0,51	З
П'єзокераміка ПКР-7М	0,49	5000	4,3	26	0,54	Поля п'єзое уздо
П'єзокераміка ЦТС-19	0,4	1730	3,9	28	0,49	
П'єзокераміка ЦТС-23	13,2	1100	3,2	32	0,68	
Ніобат літію	0,24	28,6	5,8	—	—	

Залежно від задач контролю, фізико-механічних характеристик, розмірів об'єкта дослідження, розмірів і характеристик дефектів матеріалу, які необхідно зафіксувати, використовуються роздільні або сумісні п'єзоелектричні перетворювачі.

При використанні роздільних перетворювачів один з них використовується як випромінюючий, тобто здійснює електромеханічне перетворення ультразвукових коливань у пружні хвилі, а другий – як прийомний, котрий забезпечує механіко-електричне перетворення пружних хвиль, що були порушені в матеріалі, – у відповідний електричний

сигнал.

Сумісні п'єзоелектричні перетворювачі також являють собою випромінювач і приймач, конструктивно розміщені в одному корпусі. До їх достоїнств слід віднести зручність використання та спрощення забезпечення стабільного акустичного контакту «п'єзоелектричний перетворювач – матеріал об'єкта контролю». Але вони не завжди можуть бути застосовані у практиці неруйнівного контролю якості.

Способи забезпечення акустичного контакту

«п'єзоелектричний перетворювач – досліджуваний матеріал»

Одним з основних недоліків, який властивий ультразвуковому неруйнівному контролю якості матеріалів, є необхідність створення надійного акустичного контакту «п'єзоелектричний перетворювач – матеріал об'єкта контролю» для введення зондувальних і прийому інформаційних сигналів. Це пов'язано з тим, що як при прийомі, так і при випромінюванні пружних хвиль, коливання проходять через кілька середовищ, що відрізняються своїми фізико-механічними й акустичними властивостями. Зміна розміру, товщини, матеріалу контактного середовища, площі акустичного контакту «площина п'єзоелектричного перетворювача – досліджуваний матеріал» впливає на параметри випромінюваного й інформаційного сигналів. Таким чином, якість і стабільність акустичного контакту «п'єзоелектричний перетворювач – досліджуваний матеріал» значною мірою визначає надійність і вірогідність результатів контролю.

Основними способами введення та прийому пружних коливань є контактний, іммерсійний і повітряно-акустичний [1, 4, 7, 9]. Вибір способу забезпечення акустичного контакту залежить від задач дослідження, конкретних умов проведення вимірів, стану поверхні матеріалу об'єкта контролю.

Контактний спосіб введення і прийому пружних хвиль до матеріалу об'єкта дослідження має дві модифікації.

Перша модифікація забезпечення акустичного контакту визначає наявність шару проміжного контактного середовища, що наноситься на досліджуваний матеріал у місці установки випромінюючого і прийомного п'єзоелектричних перетворювачів. Таким контактним середовищем, наприклад, може бути рідина, гліцерин, пластилін, олія, еластична пластмаса, гума тощо. Друга полягає в забезпеченні так званого «сухого точкового контакту» між п'єзоелектричними перетворювачами і матеріалом об'єкта контролю. Практика використання першої модифікації контактного способу введення і прийому пружних хвиль пока-

зує, що порушення суцільності шару контактного середовища або зміна його товщини в процесі чи контролю, чи від виміру до виміру може призводити до зниження вірогідності отриманих результатів. У зв'язку з цим, для забезпечення надійного акустичного контакту при цьому способі введення і прийому пружних хвиль необхідне виконання трьох умов:

- достатня сила притиску перетворювача. Тиск (P) на перетворювач повинен бути не менш як $P \geq 200$ Па;
- товщина шару (h) контактного середовища повинна бути менше довжини хвилі (λ) ультразвукових коливань, що використовуються при контролі якості конкретного матеріалу ($h < \lambda$);
- шар контактного середовища повинний бути суцільним відносно робочій поверхні перетворювача і досліджуваного матеріалу в місці установки перетворювачів.

При значній шорсткості поверхні об'єкта контролю може спостерігатися порушення двох останніх умов забезпечення вірогідності й надійності результатів контролю. Це зумовлено тим, що в цьому випадку, по-перше – товщина контактної шару (h) може перевищувати довжину хвилі пружних коливань (λ), і, по-друге, – нерівності на поверхні матеріалу можуть викликати додаткове розсіювання або відхилення напрямку поширення фронту пружної хвилі через порушення суцільності шару контактної середовища.

У зв'язку з цим, у ряді випадків необхідно зробити попередню підготовку – шліфування матеріалу в місці установки п'єзоелектричного перетворювача. Необхідність проведення цієї операції повинна визначатися, виходячи з умов виконання співвідношення $h < \lambda$. Причому, при аналізі виконання зазначеного співвідношення необхідно враховувати і висоту нерівностей поверхні матеріалу досліджуваного об'єкта.

Сухий точковий контакт застосовується при контролі якості матеріалів у низькочастотній частині ультразвукових коливань ($f_{\text{узк}} \leq 100$ кГц). Реалізація цієї модифікації контактної способу полягає в тім, що пружні хвилі вводяться в досліджуваний матеріал за допомогою перетворювача з перехідною сферичною або конічною насадкою. П'єзоелектричний перетворювач притискають насадкою до поверхні об'єкта контролю без застосування контактної середовища (рис. 2.2).

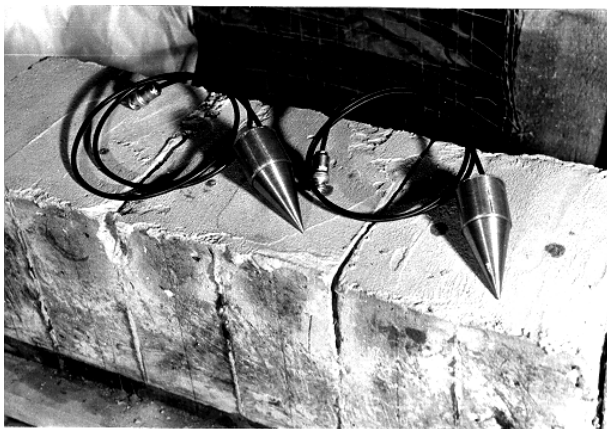


Рис.2.2 – Конічні насадки для забезпечення сухого точкового контакту «п'єзоелектричний перетворювач – досліджуванний матеріал»

Через формування точкового контакту сила притиску п'єзоелектричного перетворювача до досліджуваного матеріалу в цьому випадку значно перевищує амплітуду перемінних пружних деформацій матеріалу п'єзоелектрика, що забезпечує високу надійність вводу пружних коливань.

При реалізації цього способу контакту геометричні розміри насадок повинні вибиратися, виходячи з наступної умови:

$$L_n = n \cdot \lambda, \quad (2.22)$$

де L_n – довжина насадки; n – масштабний коефіцієнт; λ – довжина хвилі пружних коливань, що використовуються для контролю якості.

Поряд зі значними перевагами цей спосіб забезпечення акустичного контакту має суттєвий недолік, а саме: використання точкового контакту викликає формування сферичної діаграми спрямованості п'єзоелектричного перетворювача. Така особливість прийнятно-передатального тракту контрольно-вимірювального пристрою є неприпустимою при розв'язанні деяких задач неруйнівного контролю якості, які вимагають спеціальних форм діаграм спрямованості.

Імерсійний спосіб введення і прийому пружних хвиль застосовується з метою зниження нестабільності акустичного контакту. При цьому способі також використовується проміжне контактне середовище. Як таке середовище застосовується рідина. Слід зауважити, що для

реалізації цього способу товщина шару рідини (h) повинна значно перевищувати довжину хвилі пружних коливань (λ), які випромінюються в досліджуваний матеріал об'єкта контролю, тобто $h \gg \lambda$. Необхідність виконання такої умови впливає через те, що при меншій товщині шару контактного середовища може спостерігатися відбиття пружних коливань від його границь, що в ряді випадків може призводити до виникнення ефекту інтерференції хвиль. При цьому, як в області розташування випромінюючого, так і прийомного п'єзоелектричних перетворювачів формується складне акустичне поле. Через це часові та амплітудно-частотні характеристики як зондувальних, так і інформаційних сигналів не підлягають прогнозу і, отже, можуть внести значну погрішність у результат виміру і, як наслідок – у кінцеві висновки контролю якості.

При аналізі імовірності виникнення явища інтерференції хвиль, при використанні імерсійного способу забезпечення акустичного контакту, враховують параметр просторової тривалості імпульсу [4]:

$$\tau_n = c_c \cdot \tau, \quad (2.23)$$

де c_c – швидкість звуку в контактному шарі; τ – тривалість імпульсу ультразвукових коливань, які випромінюються п'єзоелектричним перетворювачем у досліджуваний матеріал.

Відсутність інтерференції коливань спостерігається в тому випадку, коли подвоєна товщина контактної шару (h) більше просторової тривалості імпульсу [4], тобто при дотриманні наступної умови:

$$h > 0,5 (c_c \cdot \tau). \quad (2.24)$$

На практиці імерсійний варіант акустичного контакту забезпечується декількома рішеннями – зануренням об'єкта контролю в імерсійну ванну; – застосуванням струминного контакту (через струмінь рідини). Як правило, імерсійний спосіб забезпечення акустичного контакту застосовують при контролі об'єктів, поверхня яких характеризується значною шорсткістю, для автоматизації неруйнівного процесу контролю. У тому випадку, якщо на поверхні матеріалу присутні макронерівності, цей спосіб не застосовується через імовірність появи перевідбиття чи розсіювання пружної хвилі як на боці випромінювання, так і на боці прийому інформаційного сигналу пружних коливань.

Повітряно-акустичний спосіб застосовується при ультразвуковому неруйнівному контролі якості виробів із пластмаси і композит-

них матеріалів. Уведення і прийом пружних хвиль у цьому випадку виконується через шар повітря, тобто без безпосереднього контакту «п'єзоелектричний перетворювач – матеріал об'єкта контролю». Цей спосіб забезпечення акустичного контакту є дуже простим, однак, він не застосовний для контролю якості металів. Суть питання полягає в значному зниженні амплітуди зондувальних сигналів пружної хвилі, що вводяться в досліджуваний метал. Цей ефект пояснюється так. Акустичні властивості повітря і металів значно відрізняються один від одного. Так, наприклад, хвильовий опір сталі для подовжніх хвиль $Z_c = 46,6 \cdot 10^6$ Па·с/см, а хвильовий опір повітря $Z_{\text{п}} = 4,3 \cdot 10^2$ Па·с/см. Питомою щільністю цих середовищ відповідно дорівнює величинам: $\rho_c = 8,3 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{\text{п}} = 1,3 \cdot 10^{-4}$ кг/м³. Таке співвідношення цих характеристик впливає на умови поширення ультразвукових коливань. У розглянутому випадку при проходженні пружної хвилі, наприклад, від п'єзоелектричного перетворювача до металу, відбувається її активне перевідбиття на границі розділу двох середовищ: «повітря – метал». Наслідком цього є значне зниження потужності ультразвукового зондувального сигналу, що поширюється в металі.

На додаток до цього робить свій вплив і малий коефіцієнт прозорості такого середовища. Аналогічна ситуація спостерігається і при прийомі інформаційного сигналу пружної хвилі. Різниця акустичних опорів для повітря і пластмаси значно менше. Так, наприклад, для ебоніту і текстоліту, що широко використовуються для виготовлення композитних і шаруватих матеріалів, $Z_{\text{пл}} = (2,9 - 3,9) \cdot 10^6$ Па·с/см., а $\rho_{\text{пл}} = (1,2 - 1,4) \cdot 10^3$ кг/м³ [2, 4]. Тому зниження акустичної енергії зондувального й інформаційних сигналів, що спостерігається при переході ними границі розділу двох середовищ: «повітря – пластмаса», є значно меншим, ніж у вище розглянутому випадку. У результаті такого сполучення акустичних параметрів повітря і матеріалу об'єкта контролю стає можливим забезпечення неруйнівного контролю якості об'єктів на основі повітряно-акустичного контакту «п'єзоперетворювач – досліджуваний матеріал» з достатнім ступенем надійності та вірогідності результатів.

Через шар контактної рідини або газу вводять в об'єкт контролю подовжню і похилу поперечну вертикально поляризовану хвилю. В останньому випадку падаюча з рідини подовжня хвиля трансформується в поперечну вертикально поляризовану хвилю. Оскільки у поперечній (горизонтально поляризованій) хвилі коливання часток рівнобіжні контактній поверхні, то в матеріалі об'єкта контролю вона збуджуватися не буде. Це пов'язано з тим, що поперечні коливання, які характеризуються таким напрямком деформацій, практично не прой-

дуть через шар рідини. У принципі, за рахунок явища в'язкості, поперечну горизонтально поляризовану хвилю стає можливим передати через тонкий шар контактної рідини. Однак при цьому спостерігатимуться великі енергетичні втрати ультразвукового імпульсу. Тому для введення хвилі такого типу в тверде тіло використовують п'єзоелектричний перетворювач, виконаний у вигляді пластини, в якому збуджують зсувні коливання. Для забезпечення акустичного контакту в цьому випадку застосовується шар клею.

Електромагнітно-стрикційне збудження і прийом пружних хвиль у матеріалах

Електромагнітно-стрикційні перетворювачі засновані на ефектах магнітострикційного, магнітної й електродинамічної взаємодії електромагнітного поля з матеріалом об'єкта контролю [2, 12]. Виходячи з цього випливає, що такі перетворювачі (ЕМС-перетворювачі) мають обмежену область застосування і можуть використовуватися тільки для ультразвукового контролю якості феромагнітних, струмопровідних і магнітодіелектричних матеріалів. Принцип дії таких перетворювачів полягає в збудженні пружних деформацій елементарних обсягів матеріалу під впливом зовнішнього магнітного поля [2, 12]. У результаті цього в матеріалі об'єкта контролю виникають пружні хвилі. Такий ефект викликається в наслідок явища магнітострикції.

Для забезпечення можливості фіксування пружних хвиль, тобто одержання інформаційних сигналів, використовується зворотний ефект – магнітопружність матеріалів. Він полягає в появі адекватного магнітного поля в результаті дії пружних деформацій елементарних об'ємів твердого тіла в постійному магнітному полі. На практиці, у зв'язку з необхідністю викликання в матеріалі об'єкта контролю пружних хвиль з необхідними параметрами амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), використовується магнітна взаємодія (взаємне періодичне притягання і відштовхування) матеріалу об'єкта контролю й електромагніта ЕМС-перетворювача, через який протікає перемінний електричний струм. Вплив перемінного електромагнітного поля на контрольований матеріал трансформується в перемінну зміну його механічних пружних деформацій, тобто в появу пружних хвиль.

Параметри (амплітуда, частота) хвиль, викликаних таким способом, залежатимуть від частоти змінюваного магнітного поля, його напруженості, а також від магнітопружних характеристик матеріалу об'єкта контролю. Прийом пружних хвиль у розглянутому випадку забезпечується в результаті коливання поверхні об'єкта контролю че-

рез поширення пружних хвиль щодо електромагніта ЕМС-перетворювача. При цьому в обмотці електромагніта збуджується перемінне магнітне поле, що приводить до появи електричного струму визначених параметрів на її виводах. Коротко описані фізичні явища характерні при дослідженні ультразвуковими методами з використанням ЕМС-перетворювачів феромагнітних і магнітодіелектричних матеріалів.

При збудженні пружних хвиль електромагнітним полем у струмопровідних матеріалах спостерігається додаткове явище – електродинамічна взаємодія магнітного поля ЕМС-перетворювача і матеріалу об'єкта контролю [2, 12]. Воно полягає у виникненні вихрових струмів, що взаємодіючи з магнітним полем ЕМС-перетворювача викликають коливання атомів матеріалу об'єкта контролю. Процес реєстрації інформаційних сигналів пружної хвилі при цьому полягає в порушенні вихрових струмів контрольованим матеріалом, ділянки якого зроблять змушені коливання через поширення пружної хвилі в магнітному полі прийомного ЕМС-перетворювача. У результаті цього в електромагніті прийомного перетворювача індукується електричний струм, параметри якого відбивають характеристики пружної хвилі, що розповсюджується у досліджуваному матеріалі.

Слід зауважити, що, на додаток до зазначених особливостей – можливості контролю якості в матеріалах визначених електромагнітних і струмопровідних властивостей, важливим недоліком ЕМС-перетворювачів є їхній низький коефіцієнт перетворення електричного сигналу в пружні коливання (і зворотного перетворення) в порівнянні з перетворювачами на основі п'єзоелектричного ефекту.

Основним достоїнством ЕМС-перетворювачів є введення і прийом пружних коливань до матеріалу об'єкта контролю безконтактним способом. Проте слід зазначити, що інтенсивність збуджуваних пружних коливань і рівень прийнятого інформаційного сигналу виявляються в цьому випадку значно нижчими, ніж при використанні контактних методів.

УЛЬТРАЗВУКОВІ МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Методи ультразвукового контролю якості матеріалів, виробів і процесів поділяються у своїй основі на дві головні групи [1, 4]:

- *активні*, в яких використовується випромінювання і прийом ультразвукових коливань і хвиль;
- *пасивні*, засновані тільки на прийомі пружних коливань і хвиль.

У кожній з цих груп виділяють методи, засновані на порушенні в об'єкті контролю в цілому чи його частині стоячих чи біжучих хвиль пружних коливань. Ці принципи і покладені в основу розробленої класифікації цих методів (рис.3.1).

Фізичну сутність цих методів розглянуто в розділі 4. Нижче описано принципи дії та узагальнені функціональні схеми контрольно-вимірювальних пристроїв, що реалізують ці методи неруйнівного контролю. Активні методи, в яких застосовують біжучі хвилі, поділяються на такі підгрупи:

- а) методи, які досліджують характеристики наскрізного інформаційного сигналу пружної хвилі, що пройшла через об'єкт дослідження;
- б) методи, що досліджують характеристики інформаційного сигналу пружної хвилі, відбитої від дефектів структури матеріалу;
- в) методи комбінації, в яких застосовують дослідження характеристик як відбитих, так і наскрізних хвиль.

Реалізація методів, заснованих на дослідженні наскрізного інфор-

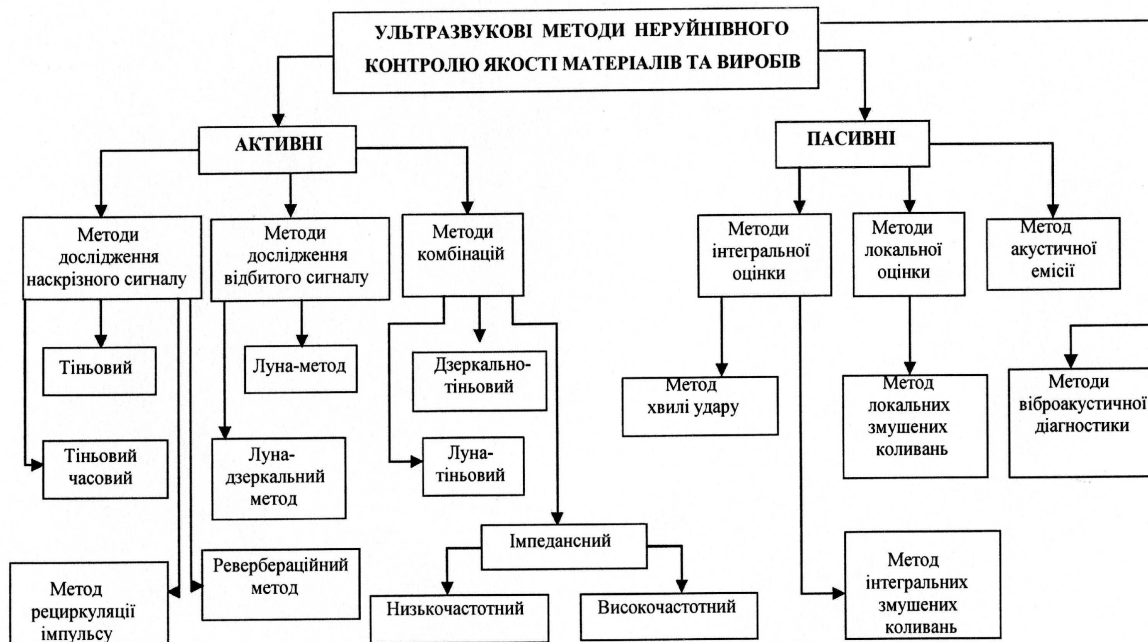


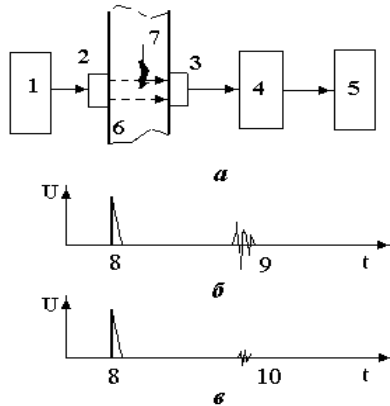
Рис.3.1 – Класифікація ультразвукових методів неруйнівного контролю якості матеріалів, виробів та будівельних конструкційних елементів

маційного сигналу, що пройшов через матеріал, припускає наявність двох перетворювачів – випромінюючого і прийомного, котрі розташовуються по різні боки досліджуваної ділянки чи об'єкта контролю в цілому. До цієї підгрупи відносяться тіньовий і часовий-тіньовий методи контролю якості матеріалів.

Тіньовий метод заснований на реєстрації зниження амплітуди наскрізного сигналу, що викликається наявністю дефекту (рис.3.2).

Наявність дефекту визначається на основі методу порівняння при вимірі амплітуд інформаційних сигналів, що формуються при дослідженні ділянки об'єкта контролю без дефекту (рис.3.2, б) і з ним (рис.3.2, а) [4, 7].

Рис. 3.2 – Структурна схема (а) і типові часові діаграми (б, в) пристрою, що реалізує тіньовий метод: 1 – генератор зондувальних імпульсів; 2, 3 – відповідно випромінюючий і прийомний п'єзоелектричні перетворювачі; 4 – підсилювач; 5 – осцилографічний індикатор; 6 – об'єкт контролю; 7 – дефект об'єкта контролю; 8 – зондувальний імпульс; 9 – наскрізний інформаційний сигнал, що пройшов через матеріал об'єкта контролю без дефекту; 10 – наскрізний інформаційний сигнал, що пройшов через матеріал об'єкта контролю з дефектом



У практиці неруйнівного контролю якості при цьому методі застосовують як імпульсне, так і безупинне випромінювання зондувальних сигналів.

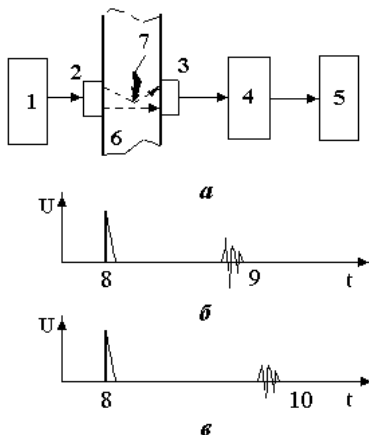
Часовий тіньовий метод є різновидом ультразвукових методів, заснованих на реєстрації зміни часу проходження імпульсів пружної хвилі через об'єкт дослідження, що викликається збільшенням його шляху через оббігання дефекту структури матеріалу (рис.3.3). Метод ефективний при дослідженні виробів, у матеріалі яких характерними є пустотні дефекти [7-9].

Методи відбиття. До цього класу методів УЗК відносяться *луна-метод* і *луна-дзеркальний метод* [1, 4, 7].

При використанні цих методів неруйнівного контролю якості ма-

теріалів застосовуються як два роздільних перетворювачі, так і один сполучений. Як зондувальний сигнал у цих методах застосовують імпульсне випромінювання пружної хвилі.

Рис. 3.3 – Структурна схема (а) і типові часові діаграми (б, в) пристрою, що реалізує часовий тінювий метод: 1 – генератор зондувальних імпульсів; 2, 3 – випромінюючий і прийомний п'єзoeлектричні перетворювачі; 4 – підсилювач; 5 – осцилографічний індикатор; 6 – об'єкт контролю; 7 – дефект об'єкта контролю; 8 – зондувальний імпульс; 9, 10 – відповідно наскрізний інформаційний сигнал, що пройшов через матеріал об'єкта контролю без дефекту та наскрізний інформаційний сигнал, що пройшов через матеріал об'єкта контролю з дефектом (при його оббіганні)



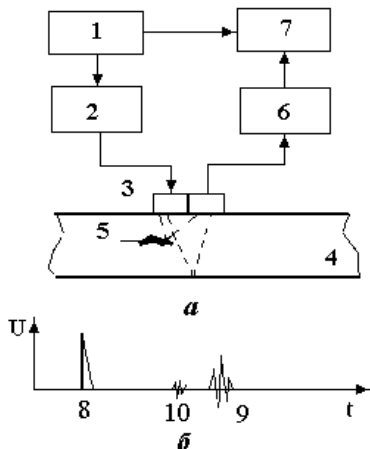
Луна-метод. Метод заснований на реєстрації луна-сигналів, що формуються при відбитті від дефектів структури матеріалу (рис.3.4). На екрані індикатора в цьому випадку спостерігаються три характерних імпульси (рис.3.4, в): 8 – зондувальний імпульс, який формується генератором випромінювання пружної хвилі (генератором зондувальних імпульсів); 9 – імпульс, відбитий від поверхні об'єкта контролю, протилежної місцеві розташування приймально-передавального перетворювача; 10 – імпульс, відбитий від дефекту структури матеріалу досліджуваного об'єкта, так називаний луна-сигнал. Час приходу імпульсів (9) і (10) пропорційний товщині об'єкта контролю і глибині залягання дефекту.

Луна-дзеркальний метод. При цьому методі контролю аналізують сигнали, що відбилися дзеркально від дефекту і від поверхні об'єкта контролю, протилежної місцю розташування перетворювачів, тобто які пройшли шлях *ABCD* (рис.3.5).

Ревербераційний метод. У цьому методі неруйнівного контролю також аналізуються характеристики відбитих сигналів пружної хвилі. В основу методу покладений ефект поступового загасання ультразвукових коливань у матеріалі контрольованого об'єкта [5, 9].

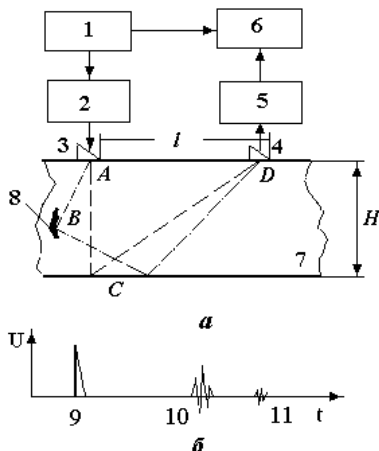
При реалізації методу аналізується час ревербераційного процесу, що взаємопов'язаний як зі щільністю структури самого досліджуваного матеріалу, так і з дефектами його структури.

Рис.3.4 – Структурна схема (а) і типова часова діаграма (б) пристрою, що реалізує ультразвуковий луна-метод: 1 – синхронізатор; 2 – генератор зондувальних імпульсів; 3 – сполучений приймально-передавальний п'єзоелектричний перетворювач; 4 – об'єкт контролю; 5 – дефект об'єкта контролю; 6 – підсилювач; 7 – осцилографічний індикатор; 8 – зондувальний імпульс; 9 – відбитий інформаційний сигнал, що пройшов через матеріал об'єкта контролю без дефекту; 10 – інформаційний сигнал, відбитий від дефекту матеріалу



В ультразвукових методах комбінації для контролю якості матеріалів використовують дослідження інформаційних сигналів, що формуються як при проходженні зондувальних сигналів через об'єкт контролю (наскрізні інформаційні сигнали), так і при відбитті пружних хвиль від дефектів структури матеріалу.

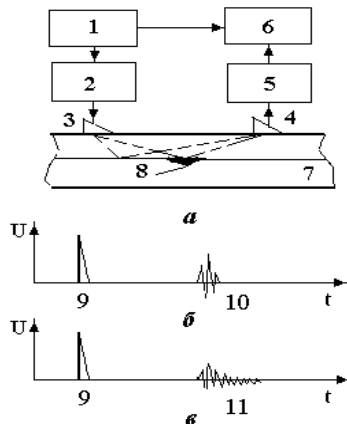
Рис.3.5 – Структурна схема (а) і типові часові діаграми (б) пристрою, що реалізує луна-дзеркальний метод: 1 – синхронізатор; 2 – генератор зондувальних імпульсів; 3, 4 – випромінюючий і прийомний п'єзоелектричні перетворювачі; 5 – підсилювач; 6 – осцилографічний індикатор; 7 – об'єкт контролю; 8 – дефект матеріалу об'єкта контролю; 9 – зондувальний імпульс; 10 – відбитий інформаційний сигнал, що пройшов через матеріал об'єкта контролю без дефекту; 11 – відбитий інформаційний сигнал, що пройшов через матеріал об'єкта контролю з дефектом (шлях A – B – C – D)



Фактично ці методи неруйнівного контролю є більш складними за своєю структурою, як у метрологічному плані, так і в плані апаратного забезпечення.

Рис. 3.6 – Структурна схема (а) і типові часові діаграми (б, в) пристрою, що реалізує часовий ревербераційний метод контролю якості:

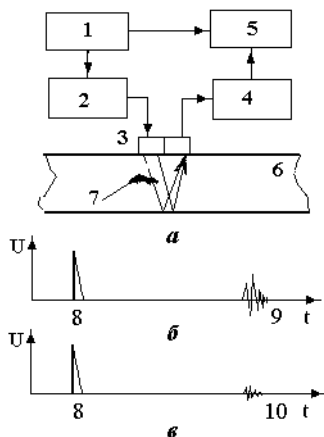
1 – синхронізатор; 2 – генератор зондувальних імпульсів; 3, 4 – відповідно випромінюючий і прийомний п'єзоелектричні перетворювачі; 5 – підсилювач; 6 – осцилографічний індикатор; 7 – двошаровий об'єкт контролю; 8 – дефект об'єкта контролю на границі шарів; 9 – зондувальний імпульс; 10 – відбитий інформаційний сигнал від границі шарів при відсутності дефекту; 11 – відбитий інформаційний сигнал від границі шарів при наявності дефекту



Розробка такої групи методів і створення відповідного апаратного забезпечення продиктовані необхідністю підвищення вірогідності й надійності результатів неруйнівного контролю на основі ультразвукових коливань. Основними методами цієї групи є дзеркально-тіньовий, луна-тіньовий та імпедансний [1, 4, 10].

Дзеркально-тіньовий метод заснований на вимірі амплітуди інформаційного сигналу, відбитого від поверхні об'єкта контролю, протилежної розміщенню п'єзоелектричних перетворювачів (рис.3.7).

Рис.3.7 – Структурна схема (а) і типові часові діаграми (б, в) пристрою, що реалізує дзеркально-тіньовий метод контролю якості: 1 – синхронізатор; 2 – генератор зондувальних імпульсів; 3 – сполучений приймально-передавальний п'єзоелектричний перетворювач; 4 – підсилювач; 5 – осцилографічний індикатор; 6 – об'єкт контролю; 7 – дефект об'єкта контролю; 8 – зондувальний імпульс; 9 – відбитий інформаційний сигнал від протилежної грані об'єкта контролю при відсутності дефекту; 10 – відбитий інформаційний сигнал від протилежної грані об'єкта контролю при наявності дефекту



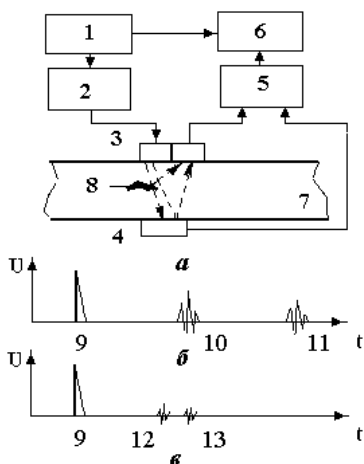
При реалізації цього методу, як правило, використовуються сполучені приймально-передавальні перетворювачі.

За фізичною сутністю цей метод близький до тіньового методу контролю. Вихідною контрольованою характеристикою методу є коефіцієнт загасання пружної хвилі. Підвищення надійності й вірогідності контролю при цьому забезпечується тим, що сигнал пружної хвилі двічі проходить матеріал об'єкта контролю в зоні розташування дефекту.

Луна-тіньовий метод заснований на аналізі як наскрізних, так і відбитих хвиль (рис.3.8).

Рис.3.8 – Структурна схема (а) і типові часові діаграми (б, в) пристрою, що реалізує ультразвуковий луна-тіньовий метод комбінацій:

1 – синхронізатор; 2 – генератор зондувальних сигналів; 3 – сполучений приймально-передавальний п'єзоелектричний перетворювач; 4 – п'єзоелектричний приймач; 5 – підсилювач; 6 – осцилографічний індикатор; 7 – об'єкт контролю; 8 – дефект структури матеріалу об'єкта контролю; 9 – зондувальний імпульс; 10 – наскрізний інформаційний сигнал на п'єзоелектричному приймачі 4 (матеріал без дефекту); 11 – відбитий від протилежної поверхні об'єкта контролю інформаційний сигнал на сполученому п'єзоелектричному перетворювачі 3 (матеріал без дефекту); 12, 13 – відповідно наскрізний і відбитий від протилежної поверхні об'єкта контролю інформаційні сигнали при наявності дефекту матеріалу



Суттєвою відмінністю цього методу є використання для реалізації контролю трьох п'єзоелектричних перетворювачів. Один з них є випромінюючим, а два інших – прийомними. Причому, один із прийомних п'єзоелектричних перетворювачів розташовується на одній площині об'єкта контролю з випромінюючим, а другий – на протилежній.

За аналогією з попереднім розглянутим методом контролю, у якості умовно називаних основних перетворювачів використовується сполучений приймально-передавальний п'єзоелектричний перетворювач (рис.3.8, поз. 3).

У результаті такої побудови схеми контролю забезпечується фіксування двох інформаційних сигналів. Перший – сигнал, що сформувався в наслідок відбиття від дефекту структури матеріалу, і другий –

наскрізний сигнал, який пройшов через цей дефект.

Імпедансний метод заснований на аналізі акустичного імпедансу ділянки поверхні контрольованого об'єкта, що безпосередньо залежить від фізико-механічних характеристик матеріалу об'єкта контролю. Оскільки з поверхнею об'єкта контролю взаємодіє п'єзоелектричний перетворювач, то в результаті цього змінюється його механічне навантаження [2, 4, 7]. Узагальнено можна сказати, що в цьому випадку змінюються і його фізико-електричні характеристики. Як наслідок – зміна цих характеристик відбивається на параметрах інформаційного сигналу. За їхньою зміною і відбувається контроль якості досліджуваного матеріалу, визначається наявність чи відсутність дефектів.

Метод фіксує з достатнім ступенем надійності структурні дефекти матеріалу, що розташовані в безпосередній близькості від поверхні контрольованого об'єкта. При реалізації цього методу введення пружних хвиль може виконуватися безпосереднім контактом «досліджуванний об'єкт – п'єзоелектричний перетворювач» або через додатковий проміжний конструктивний елемент, на якому закріплюються п'єзоелектричні перетворювачі (рис.3.9, поз.3).

У практиці неруйнівного контролю якості матеріалів використовуються два різновиди цього методу – низькочастотний і високочастотний. У *низькочастотному* імпедансному методі використовуються частоти випромінювання до 100 кГц, а у *високочастотному* – вище 100 кГц.

У низькочастотному імпедансному ультразвуковому методі контролю якості використовується опосередковане введення пружних хвиль у матеріал досліджуваного виробу. Для цього застосовується проміжний механічний ультразвуковий трансформатор (рис.3.9, поз.3), на якому закріплюються випромінюючий (рис.3.9, поз.4) і прийомний (рис.3.9, поз.5) перетворювачі.

Наявність дефекту структури матеріалу досліджуваного об'єкта, наприклад, у вигляді розшарування бетону, зменшує його механічний імпеданс у місці контролю. У результаті цього змінюється режим коливань механічного трансформатора (зменшуються механічні напруги), що відбивається на вихідних характеристиках прийомного п'єзоелектричного перетворювача.

У високочастотному імпедансному ультразвуковому методі контролю якості виробляється безпосереднє введення пружних хвиль. Причому, як правило, використовується сполучений прийомно-передавальний п'єзоелектричний перетворювач (рис. 3. 10).

Фізико-механічні умови генерування зондувального сигналу таким методом також залежать від акустичного імпедансу ділянки поверхні

об'єкта контролю, на якому встановлений п'єзоелектричний перетворювач.

Рис.3.9 – Структурна схема (а) і типові часові діаграми (б, в) пристрою для реалізації ультразвукового низькочастотного імпедансного методу контролю якості:
1 – синхронізатор; 2 – генератор зондувальних сигналів; 3 – механічний трансформатор; 4 – п'єзоелектричний випромінювач; 5 – п'єзоелектричний приймач; 6 – підсилювач інформаційного сигналу; 7 – осцилографічний індикатор; 8 – контрольований об'єкт; 9 – дефект структури матеріалу об'єкта контролю; 10 – зондувальний імпульс; 11 – інформаційний сигнал при відсутності дефекту матеріалу; 12 – інформаційний сигнал при наявності дефекту матеріалу

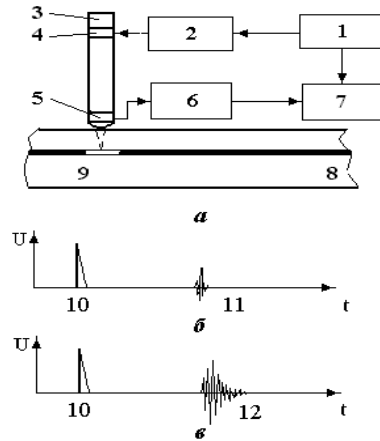
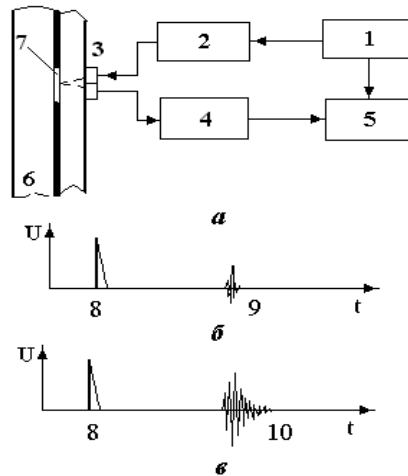


Рис.3.10 – Структурна схема (а) і типові часові діаграми (б, в) пристрою для реалізації ультразвукового високочастотного імпедансного методу контролю якості:
1 – синхронізатор; 2 – генератор зондувальних імпульсів; 3 – сполучений прийомно-передавальний п'єзоелектричний перетворювач; 4 – підсилювач інформаційного сигналу; 5 – осцилографічний індикатор; 6 – об'єкт контролю; 7 – дефект структури матеріалу об'єкта контролю; 8 – зондувальний імпульс; 9 – інформаційний сигнал при відсутності дефекту матеріалу; 10 – інформаційний сигнал при наявності дефекту в матеріалі



Методи другої групи – *пасивні*, також мають розгалужену структуру. У цій групі логічним є виділення методів, що відрізняються фізикою процесу порушення коливань пружної хвилі в об'єкті контролю і методів, різних у плані постановки і реалізації задачі дослідження.

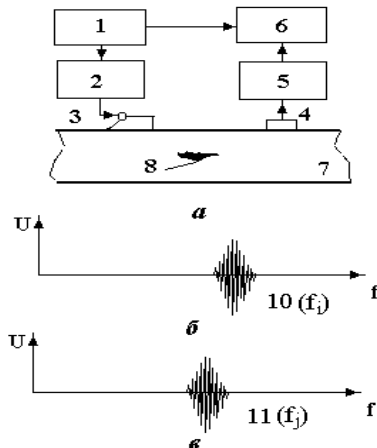
Внаслідок такого підходу ці методи розділяються на *методи інте-*

гральної оцінки фізико-механічних властивостей матеріалів і методи локальної оцінки фізико-механічних властивостей на ділянках об'єкта контролю.

При використанні цієї групи методів є можливість виміру комплексу характеристик: частоти вільних коливань з максимальною амплітудою; резонансних частот змущених коливань, що трохи відрізняються від частоти вільних коливань через механічний зв'язок у системі «об'єкт контролю – випромінюючий перетворювач пружних хвиль»; амплітудно-частотної характеристики (АЧХ). Можуть контролюватися також і величини, пов'язані із загасанням коливань пружної хвилі, – амплітуда вільних чи резонансних коливань, добротність коливань, ширина резонансного піка [1, 2, 4, 7].

Реалізація методів інтегральної оцінки фізико-механічних властивостей матеріалів припускає збудження вільних або змущених коливань у всьому досліджуваному об'єкті. Вільні коливання збуджують за допомогою імпульсного механічного чи електромеханічного зовнішнього впливу на об'єкт дослідження. Різновидом цих методів є *метод хвилі удару*, в якому імпульсна ударна хвиля збуджується спеціальним механічним пристроєм (рис.3.11). У результаті цього в об'єкті контролю спостерігаються пружні коливання, що характеризуються широким спектром частот.

Рис.3.11 – Структурна схема (а) і типові часові діаграми (б, в) пристрою для реалізації методу хвилі удару: 1 – синхронізатор; 2 – імпульсний підсилювач потужності; 3 – імпульсний ударний пристрій; 4 – прийомний п'єзоелектричний перетворювач; 5 – підсилювач інформаційного сигналу; 6 – аналізатор спектра (вимірник резонансної частоти); 7 – об'єкт контролю; 8 – дефект структури матеріалу об'єкта контролю; 9 – інформаційний сигнал резонансної частоти f_i при відсутності дефекту в матеріалі; 10 – інформаційний сигнал резонансної частоти f_j при наявності дефекту в матеріалі

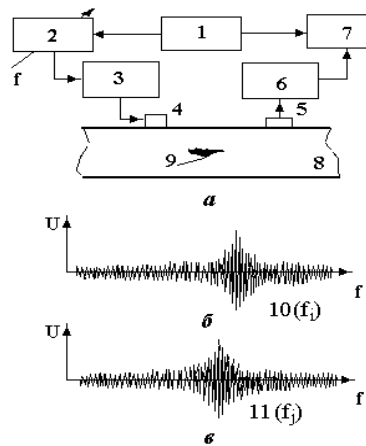


Інтегральний метод змущених коливань полягає в порушенні пружних хвиль у досліджуваному виробі за допомогою впливу на нього електромеханічного чи п'єзоелектричного випромінюючого перет-

ворювача (рис.3.12).

Рис.3.12 – Структурна схема (а) і типові часові діаграми (б, в) пристрою для реалізації інтегрального методу змушених коливань:

1 – синхронізатор; 2 – генератор з частотою, що змінюється; 3 – підсилювач потужності; 4 – випромінюючий п'єзоелектричний перетворювач; 5 – прийомний п'єзоелектричний перетворювач; 6 – широкополосний підсилювач; 7 – аналізатор спектра (вимірник резонансної частоти); 8 – об'єкт контролю; 9 – дефект структури матеріалу об'єкта контролю; 10 – інформаційний сигнал резонансної частоти f_i при відсутності дефекту в матеріалі; 11 – інформаційний сигнал резонансної частоти f_j при наявності дефекту в матеріалі



Таким чином, для реалізації цього методу неруйнівного контролю якості необхідний безпосередній постійний зв'язок «об'єкт дослідження – випромінюючий перетворювач». При цьому збудження пружних хвиль у досліджуваному виробі виконується безупинно. Залежно від задачі дослідження, переліку необхідних контрольованих характеристик частота випромінювання може бути постійною чи змінюватися у визначеному діапазоні.

У ряді випадків використовують *інтегральний метод змушених коливань*, що полягає в аналізі коливань системи «об'єкт контролю – випромінюючий перетворювач» при резонансних частотах.

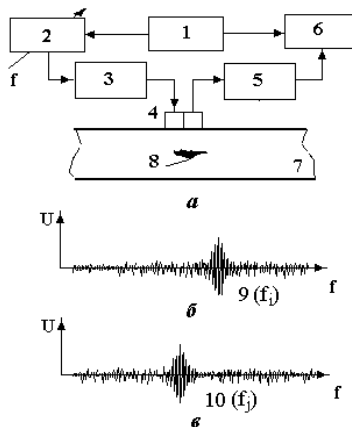
Фактично цей метод близький до методу хвилі удару, однак, інтерпретація отриманих даних контролю в цьому випадку ускладнюється через створення додаткової механічної системи «об'єкт контролю – випромінюючий перетворювач». Ця система має свою амплітудно-частотну характеристику, параметри якої відрізняються від АЧХ об'єкта контролю. При дослідженнях параметри АЧХ додаткової системи накладаються на АЧХ об'єкта контролю, тим самим зумовлюючи так називаний маскуючий ефект.

У зв'язку з цим, при реалізації цього методу контролю якості необхідною умовою є ретельне дослідження як АЧХ системи «об'єкт контролю – випромінюючий перетворювач», так і ефекту її впливу на АЧХ досліджуваного об'єкта.

Метод локальних змушених коливань полягає в збудженні пруж-

них коливань у деякому обмеженому обсязі об'єкта контролю (рис.3.13) [4, 10]. У цьому випадку для випромінювання коливань застосовують генератори невисокої потужності, з частотою, що змінюється.

Рис.3.13 – Структурна схема (а) і типові часові діаграми (б, в) пристрою для реалізації методу локальних змущених коливань: 1 – синхронізатор; 2 – генератор з частотою, що змінюється; 3 – підсилювач потужності; 4 – сполучений прийомно-передавальний п'єзоелектричний перетворювач; 5 – широкополосний підсилювач; 6 – аналізатор спектра (вимірник резонансної частоти); 7 – об'єкт контролю; 8 – дефект структури матеріалу об'єкта контролю; 9 – інформаційний сигнал резонансної частоти f_i при відсутності дефекту матеріалу; 10 – інформаційний сигнал резонансної частоти f_i при наявності дефекту матеріалу



Збудження пружних хвиль у досліджуваному матеріалі та прийом інформаційного сигналу здійснюють у більшості випадків сполученим прийомно-передавальним п'єзоелектричним перетворювачем.

Аналогічно методу інтегральних змущених коливань у процесі дослідження фіксують резонансні частоти, за якими визначають наявність дефектів структури матеріалу об'єкта контролю.

Метод акустичної емісії також відноситься до категорії пасивних методів ультразвукового неруйнівного контролю якості. Явище акустичної емісії полягає у випромінюванні пружних хвиль матеріалом об'єкта контролю в результаті природної внутрішньої динамічної локальної перебудови його структури. Цей процес виявляється, наприклад, при виникненні й розвитку тріщин, формуванні кристалічної структури матеріалу.

Для реалізації цього методу контролю, залежно від постановки задачі, використовують один чи кілька прийомних ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів (рис.3.14) [4, 11]. У структурі таких контрольно-вимірювальних системи поряд зі стандартними блоками виміру амплітуди, проміжку часу між інформаційними сигналами, які надходять на п'єзоелектричні перетворювачі, як правило, використовуються аналізатори спектру інформаційних сигналів та ПЕОМ для одержання повної інформації з формування або зміни структури досліді-

джуваного матеріалу в зразку, виробі чи конструкції.

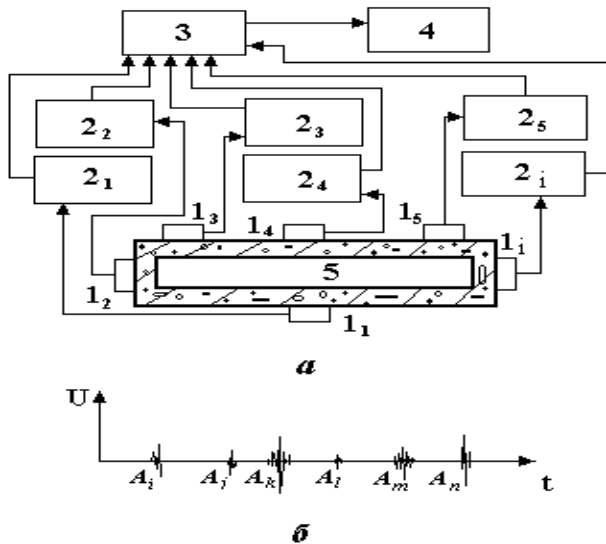


Рис.3.14 – Структурна схема (а) і типова часова діаграма (б) пристрою для реалізації методу акустичної емісії з декількома прийомними перетворювачами:

$1_1 - 1_i$ – прийомні ультразвукові п'єзоелектричні перетворювачі; $2_1 - 2_i$ – підсилювачі сигналів акустичної емісії; 3 – мікшерний пристрій; 4 – блок обробки результатів вимірів; 5 – об'єкт контролю; A_q – сигнали пасивної акустичної емісії, що надходять від прийомних ультразвукових п'єзоелектричних перетворювачів ($1_1 - 1_i$)

При проведенні контролю досліджуються амплітуда, інтенсивність, спектральні характеристики інформаційних сигналів, кількість та послідовність імпульсів акустичної емісії.

Необхідною умовою для проведення контролю з достатнім рівнем вірогідності в цьому випадку є виключення зовнішніх механічних та електромагнітних наведень: – вібраційних, акустичних, ультразвукових впливів на об'єкт контролю і п'єзоелектричні перетворювачі. У зв'язку з такими особливостями проведення досліджень метод пасивної акустичної емісії використовується, в більшості випадків, тільки в спеціалізованих лабораторних умовах, які виключають перераховані вище зовнішні наведення на об'єкт контролю, або для дослідження стану конструкційних елементів у об'єктах, які характеризуються підвищеною небезпекою для людини та навколишнього середовища. Це пов'язано з достатньо високою ціною таких систем.

Реалізація цього методу для проведення контролю у виробничих умовах, для натурних експериментів потребує значного ускладнення

контрольно-вимірювальної апаратури, яке, в свою чергу, пов'язане з досить суттєвими економічними затратами.

Для одержання результатів потрібної вірогідності та точності використовують блоки фільтрів, спеціалізовані п'єзоелектричні перетворювачі та підсилювачі інформаційних сигналів. У зв'язку з вище викладеним, цей метод неруйнівного контролю застосовується для дослідження відповідальних конструкційних елементів у будівельних спорудах і конструкціях, до яких ставляться підвищені вимоги до надійності в процесі їхньої експлуатації. До таких об'єктів відносяться, наприклад, промислові споруди, які характеризуються значною потенційною небезпекою для населення, навколишнього середовища, або вихід із ладу котрих може призвести до значних економічних збитків. Розробка таких методів обумовлена, з одного боку, об'єктивною необхідністю удосконалювання процесу діагностики експлуатованих конструкційних елементів, дослідження властивостей нових будівельних матеріалів і, з іншого боку, – підвищенням вимог до точності й надійності результатів контролю.

Сучасні наукові напрямки в області неруйнівних методів контролю, заснованих на виявленні взаємозв'язку «параметр пружних коливань – характеристика об'єкта контролю», продиктовані вимогами сьогодення. Так, на поточний період часу створені різні модифікації методів неруйнівного контролю [59, 79-89]. При реконструкції, проведенні ремонтних робіт виникає необхідність у розробці нових допоміжних матеріалів, наприклад клеїв та композицій на їх основі. Такі матеріали використовуються у різних кліматичних умовах, які впливають на їхні технологічні властивості. У зв'язку з цим виникає потреба розв'язання задач дослідження таких матеріалів для забезпечення необхідних фізико-механічних властивостей. Ця задача також може бути розв'язана за допомогою методів ультразвукового контролю. Таким чином, розробка та удосконалення методів неруйнівного контролю, що розглядаються, в дійсний період часу є актуальною задачею.